

# Evaluación de la fragmentación industrial de sulfuros polimetálicos mediante emisión acústica.

Por N. MARTINEZ (\*), M. MONTOTO (\*) y R. COY-YLL (\*\*)

## RESUMEN

Se realiza un análisis petrofísico de dos tipos de sulfuros polimetálicos del «Cinturón Píritico» de Huelva, con el fin de conocer la evolución de su microfisuración interna cuando se someten a procesos de fragmentación industrial. Dicho análisis se centra en sus comportamientos deformacionales y microfractográficos. En especial se ha perseguido conocer el papel desempeñado por las discontinuidades internas de la roca, es decir, si éstas se comportan, o no, como planos de debilidad favoreciendo una más fácil fragmentación.

Mediante experiencias de laboratorio se han estudiado sus comportamientos geomecánicos bajo ensayos de compresión uniaxial y tracción indirecta. Durante los ensayos se ha registrado la emisión acústica, mayoritariamente asociada al desarrollo fisural.

Este análisis petrofísico se ha basado en estudios mediante microscopía óptica de reflexión y proceso digital de imágenes.

## ABSTRACT

A petrophysical analysis of two types of polymetallic sulphides from the Huelvan «Pyrite Belt» is done, in order to know the evolution of the internal microfissuration when they are submitted to industrial fragmentation processes. This analysis is focused on their deformational and microfractographic behaviour. It has been specially attempted to know the influence of the rock internal discontinuities, that is, if these discontinuities act as weakness planes making easy the fragmentation process.

The geomechanical behaviour of these materials has been studied under uniaxial compression and Brazilian tests and the acoustic emission, monitored principally related to the fissure development, has been recorded during the tests evolution.

The petrographic studies were realized on light reflected microscopy and digital image processing.

## INTRODUCCION

Los materiales rocosos contienen todo tipo de discontinuidades petrográficas que inciden en sus propiedades mecánicas, por ejemplo la resistencia a la compresión uniaxial y a la tracción. Estas propiedades están directamente relacionadas con los procesos deformacionales que sufre una partícula de roca durante la fragmentación industrial. Entre estas discontinuidades merece la pena destacar las de tipo mineralógico, textural y fractográfico; también, a menor escala, las debidas a la

porosidad y alteración de las distintas fases minerales (SUÁREZ DEL RÍO, 1982; KRANZ, 1983; MONTOTO, 1983).

La cuantificación de estas características petrográficas permite un mejor conocimiento de su influencia en las propiedades mecánicas del material y mejorar el conocimiento de los procesos de fragmentación industrial, al permitir incluirlas en las ecuaciones que modelizan estos procesos (OKA y MAJIMA, 1970; KELLY y SPOTTISWOOD, 1982).

Esta cuantificación se puede mejorar mediante técnicas de proceso digital de imágenes, aplicadas a preparaciones observadas mediante diferentes técnicas microscópicas. Estas técnicas también se aplican con éxito a la cuantificación de las fisuras

(\*) Departamento de Geología, Universidad de Oviedo. Oviedo (España).

(\*\*) Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Universidad Complutense de Madrid. Madrid (España).



desarrolladas en los procesos de rotura de materiales rocosos (MONTOTO, 1982; BEL-LAN, 1984).

Por otra parte, mediante el registro de la E. A. generada durante la realización de estos ensayos mecánicos, se consigue un mejor conocimiento del desarrollo de la fisuración que conduce a la rotura final de los materiales (MONTOTO, SUÁREZ DEL RÍO, KHAIR y HARDY, 1981b; SUÁREZ DEL RÍO, 1982).

Aplicando estos métodos al estudio de los procesos de fragmentación industrial, se puede controlar la evolución de la relación mineralogía/red fractográfica desarrollada, lo que permite conocer el grado de liberación existente entre las diferentes fases minerales que forman estas rocas, así como la morfología y granulometría del producto final.

## DESCRIPCION PETROGRAFICA

Este estudio se realiza sobre dos tipos de materiales piríticos; son sulfuros polimetálicos procedentes del Cinturón Pirítico Hispano-Portugués, provincia metalogénica situada en la Zona Surportuguesa del Macizo Hespérico (LOTZE, 1945).

Estas mineralizaciones aparecen en el denominado «Grupo Volcánico-sedimentario» (FERNÁNDEZ, 1982), formado por rocas volcánicas ácidas, básicas e intermedias, sedimentos tufíticos, tobáceos, líticos, depósitos de sulfuros, jaspes y mineralizaciones de manganeso. Su potencia es muy variable (800 m. como máximo) y su edad es Tournaisiense-Viseense Inferior.

### Pirita silícea con calcopirita

Roca de color gris oscuro, sin discontinuidades geomecánicas. Textura granuda, de grano medio, con aspecto clástico. Su composición modal es la siguiente: pirita, 79 por 100; cuarzo, 18 por 100, y calcopirita, 3 por 100.

Mediante microscopía óptica de reflexión y S. E. M. se ven masas anhedrales de pirita de hasta varios mm., aunque son muy frecuentes los idio-blastos, con un tamaño medio de 100  $\mu\text{m}$ .; intersticialmente respecto a la pirita se sitúan el cuarzo y la calcopirita. El primero forma acumulaciones anhedrales de hasta varios mm., no distinguién-

dose granos individuales o rellena fracturas presentes dentro de los granos de pirita. La calcopirita tiene un tamaño medio de varias decenas de  $\mu\text{m}$ . y también puede aparecer relleno de fracturas dentro de los granos de pirita. Los bordes entre estos minerales son irregulares, frecuentemente rectos (fig. 1).

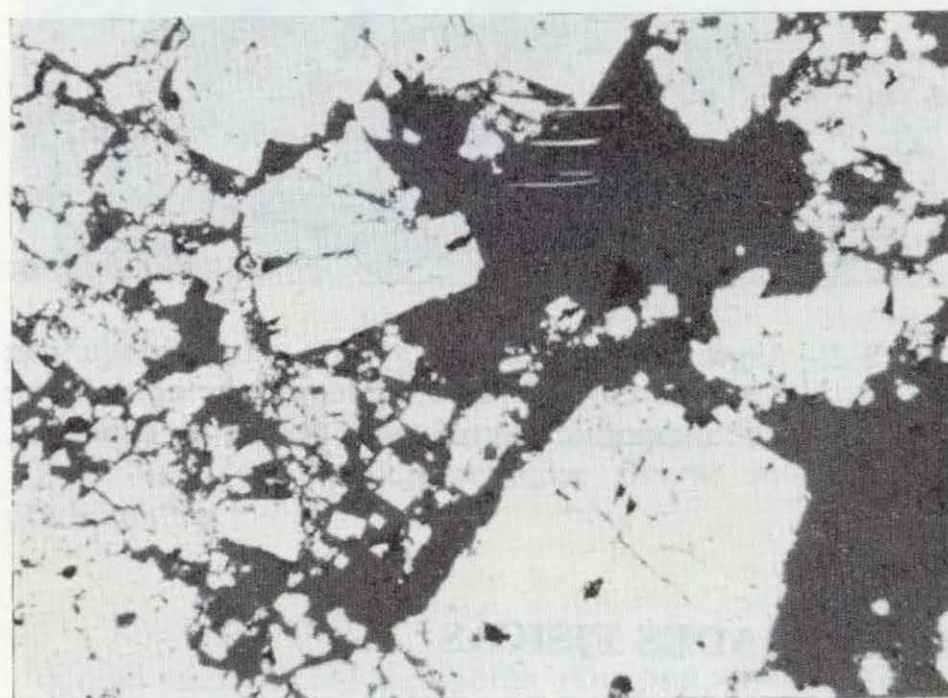


Figura 1.—Aspecto de la textura. Pirita silícea con calcopirita. Pirita: color blanco; cuarzo: color gris. Microscopía óptica de reflexión, n. p. ( $\times 280$ ).

### Pirita carbonatada con calcopirita

Roca de color gris oscuro. Presenta algunas diaclasas con orientaciones diversas y numerosas fisuras mineralizadas. Se distinguen varios sistemas de fisuras, siendo el más persistente (además de estar formado por fisuras de mayor anchura) el definido por fisuras (sistema 1) que forman un ángulo de unos  $30^\circ$  con el eje de las probetas y discos orientados que se usan en los ensayos mecánicos.

La textura es de grano fino y la composición modal es la siguiente: pirita, 87 por 100; carbonatos (calcita y algo de siderita), 10 por 100, y calcopirita, 3 por 100. La pirita presenta formas subhedrales, siendo muy frecuentes ideoblastos, con un tamaño medio de varias decenas de  $\mu\text{m}$ . Los bordes entre estos minerales son irregulares, frecuentemente rectos (fig. 2).

El estudio fractográfico muestra que las numerosas fisuras, con una anchura que varía entre varias  $\mu\text{m}$ . y unos 2 mm., aparecen rellenas por carbonatos y calcopirita.



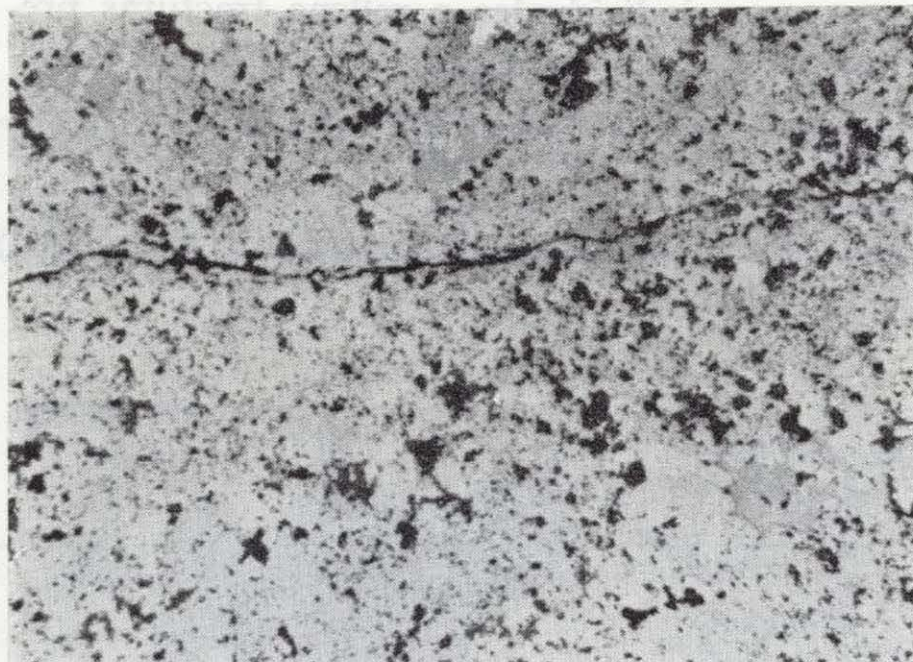


Figura 2.—Aspecto de la textura. Pirita carbonatada con calcopirita. Pirita: color blanco; calcopirita: color gris; carbonatos: color negro. Microscopía óptica de reflexión, n. p. ( $\times 70$ ).

## PROPIEDADES FISICAS

Las propiedades físicas elementales aparecen en la tabla 1. Para su cálculo se siguen las normas recomendadas por BELIKOV et al. (1967).

**TABLA 1**

	$P_g$	$P_d$	$n_o$	$n$	$i_s$	$S_r$
$P_s$ ... ..	4110	4071	0.31	0.90	0.08	34.44
$P_c$ ... ..	4928	4780	0.80	3.00	0.11	26.66

$P_s$ : Pirita silícea con calcopirita.  $P_c$ : Pirita carbonatada con calcopirita.  $P_g$ : Peso específico de los granos minerales ( $\text{Kg/m}^3$ ).  $P_d$ : Densidad aparente de la roca seca ( $\text{Kg/m}^3$ ).  $n_o$ : Porosidad abierta (%).  $n$ : Porosidad total (%).  $i_s$ : Contenido en humedad de saturación (%).  $S_r$ : Grado de relleno de los poros (%).

## ENSAYOS MECANICOS

Para los ensayos de compresión uniaxial se emplean probetas de 65 mm. de longitud y 29 mm. de diámetro (esbeltez 2.2). En los ensayos de tracción indirecta se emplearon discos de roca con un diámetro de 29 mm. y una altura comprendida entre 14 y 16 mm.

La carga se aplicó con una prensa IBERTEST de sistema rígido, regulada para permitir aplicar una carga máxima de 60 Tm. en los ensayos de compresión uniaxial y de 6 Tm. en los de tracción indirecta y se siguieron las normas recomendadas por la I. S. R. M. En los ensayos de tracción indirecta se colocaron dos discos de cartón entre la zona de la probeta a cargar y la prensa, con el fin de conseguir una mejor distribución de los esfuerzos aplicados.

En los ensayos de compresión uniaxial se colocaron bandas extensométricas longitudinales y, en ambos tipos de ensayos, se registró la emisión acústica generada mediante un equipo AET (Acoustic Emission Technology) GR-204. Se emplearon transductores AC-175-L, con una banda de frecuencias entre 100 y 300 Khz. La señal se amplificó hasta 90 Db y las medidas se efectuaron en «cuentas por segundo» (counts/s). Como medio de contacto probeta/transductor se dispuso una capa fina de grasa de alto vacío.

## Compresión uniaxial

### PIRITA SILICEA

La relación esfuerzo/deformación y el registro de la emisión acústica se observan en la figura 3.

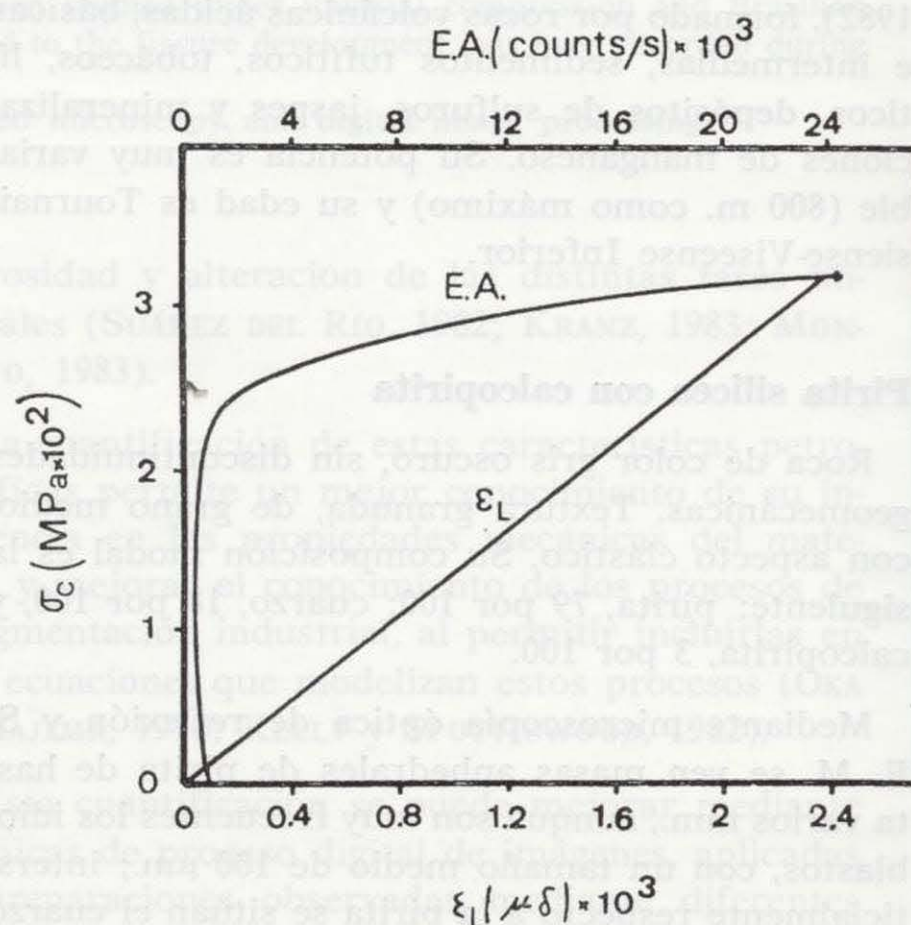


Figura 3.—Curvas esfuerzo/deformación y emisión acústica registrada. Pirita silícea.



El comportamiento es elástico; los valores medios de la resistencia a la compresión y de los módulos de Young aparecen en la tabla 2.

**TABLA 2**

	$R_c$ (MPa)	$E_t$ (MPa $\times 10^4$ )	$E_s$ (MPa $\times 10^4$ )
Pirita silícea ...	$332 \pm 75$	$14 \pm 1.5$	$14 \pm 1.5$

Los valores de  $R_c$  fluctúan entre 460 y 201 MPa, debido a las inhomogeneidades texturales del material.

El umbral de microfisuración se sitúa entre el 62 por 100 y el 72 por 100 del valor de  $R_c$ . La rotura final de las probetas se produce según el modelo de «partición vertical».

#### PIRITA CARBONATADA

Las curvas esfuerzo/deformación, con registro de la emisión acústica, aparecen en la figura 4 y, en base a este registro, se diferencian dos comportamientos:

a) Probetas con un umbral de microfisuración

mecánico situado entre el 82 por 100 y el 92 por 100 de su  $R_c$  (fig. 4a).

b) Probetas con este umbral situado entre el 68 por 100 y el 76 por 100 del valor de  $R_c$  (fig. 4b).

El comportamiento es elástico, con valores muy parecidos para los módulos de Young. Los valores de estos módulos, junto con los de  $R_c$ , aparecen en la tabla 3.

**TABLA 3**

	$R_c$ (MPa)	$E_t$ (MPa $\times 10^4$ )	$E_s$ (MPa $\times 10^4$ )
A ... ..	$200 \pm 49$	$33 \pm 10$	$33 \pm 10$
B ... ..	$225 \pm 8$	$31 \pm 10$	$31 \pm 10$

A: Rotura según fisuras mineralizadas preexistentes.

B: Rotura no condicionada por fisuras mineralizadas preexistentes.

En el caso a) las probetas rompen, o bien según fisuras del sistema 1, en cuyo caso los valores de  $R_c$  fluctúan bastante (entre 245 y 148.5 MPa.), debido a que estos valores dependen de la resistencia a la cizalla según estas fisuras mineralizadas

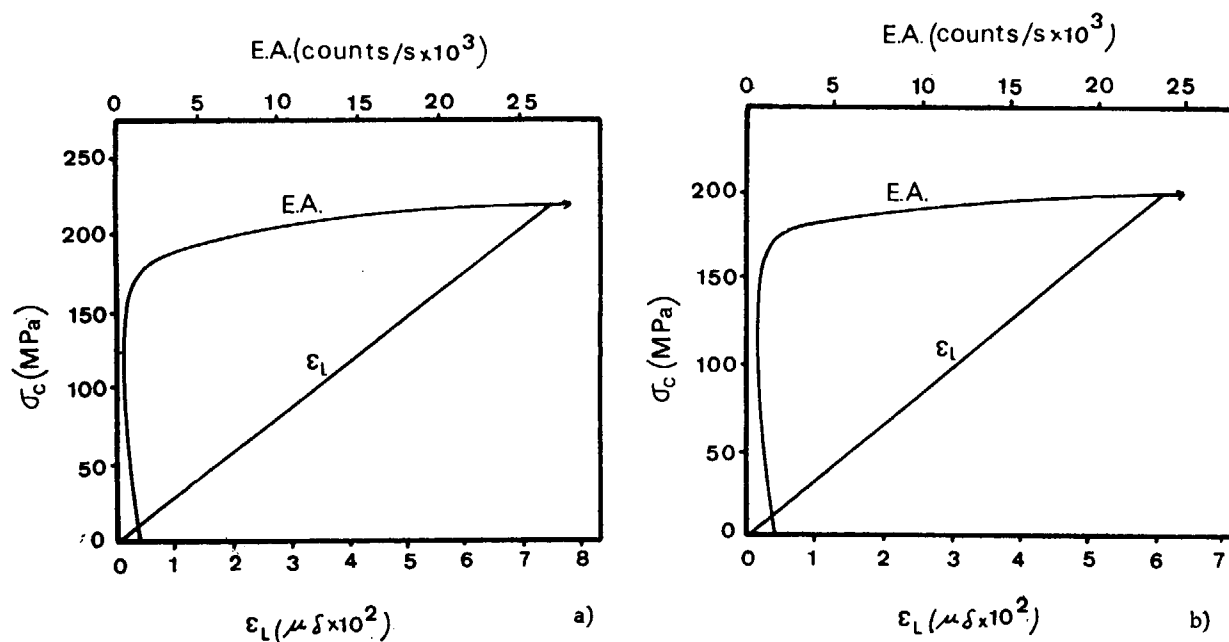


Figura 4.—Curvas esfuerzo/deformación y emisión acústica registrada. Pirita carbonatada.

(función, a su vez, de los valores de  $c$  y  $0$ , parámetros que pueden tener valores muy variables, dependiendo de la «perfección del sellado» ejercido por esta mineralización), o bien por «partición vertical».

En el caso *b*) las probetas rompen, o bien según el modelo de «partición vertical», o bien según una combinación de este modelo con el de «rotura conoclástica».

Respecto a la pirita silícea, la pirita carbonatada presenta módulos de Young más elevados, debido a que esta última tiene una textura más homogénea y de grano más fino y uniforme, aunque debe de tenerse en cuenta la diferente composición mineralógica de ambos tipos de roca, diferencia que incide a través de las diferentes compresibilidades de los minerales que forman las rocas. La pirita carbonatada presenta una resistencia menor debido a la presencia de las fisuras mineralizadas.

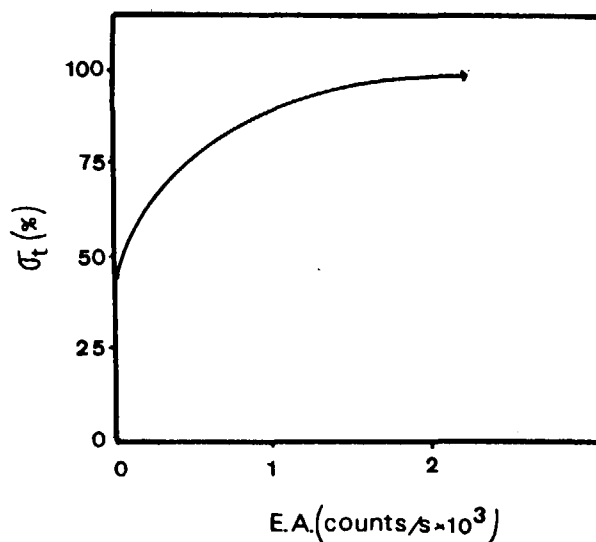


Figura 5.—Curva esfuerzo/emisión acústica. Pirita silícea.

### Tracción indirecta (Ensayo brasileño)

#### PIRITA SILICEA

Su resistencia a la tracción ( $R_t$ ) es de 31.4 MPa; la relación esfuerzo/emisión acústica aparece en la figura 5. El umbral de microfisuración se sitúa entre el 40 por 100 y el 50 por 100 del valor de  $R_t$ . Hay una cierta dispersión en el valor de  $R_t$  debido a la inhomogeneidad textural y mineralógica de la roca.

#### PIRITA CARBONATADA

En base a las curvas esfuerzo/emisión acústica (fig. 6) se distinguen dos comportamientos. En unos casos el umbral de microfisuración se sitúa entre el 71 por 100 y el 97 por 100 del valor de  $R_t$  y la rotura se produce según fisuras del sistema 1 (fig. 6a). En otros casos el umbral de microfisuración se sitúa entre el 76 por 100 y el 79 por 100 del valor de  $R_t$  (fig. 6b) y la rotura

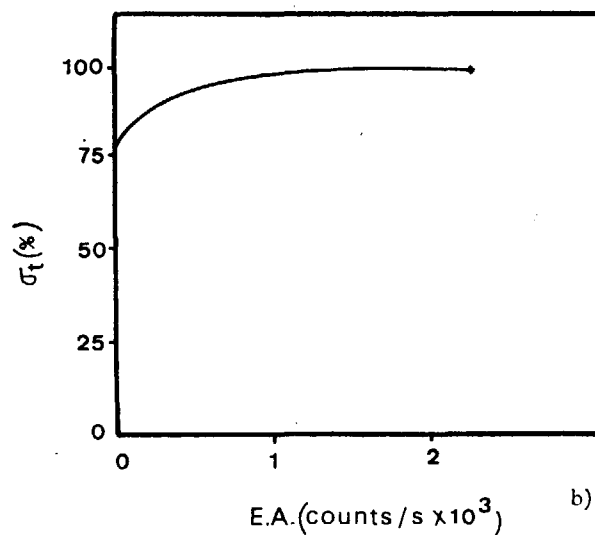
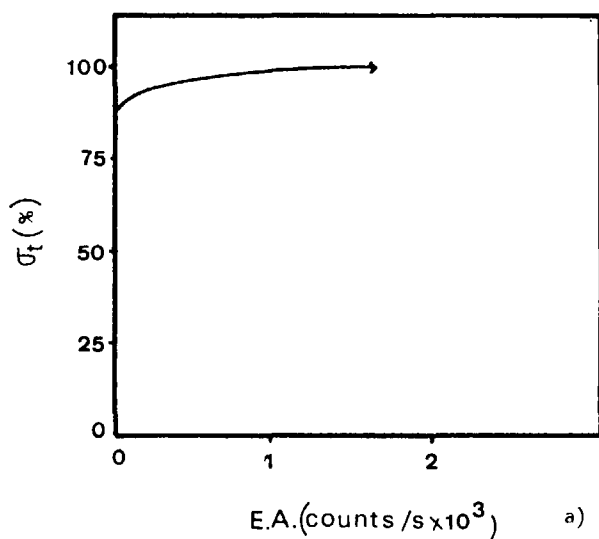


Figura 6.—Curvas esfuerzo/emisión acústica. Pirita carbonatada.



se produce por un plano diametral paralelo a la dirección de aplicación de la carga. El valor de  $R_t$  es de 31.7 MPa (lógicamente, este valor sólo es válido en el segundo caso).

La rotura está condicionada (aparte de por las propias características de la «intact rock») por la densidad y naturaleza de las fisuras mineralizadas y por la relación entre la orientación de estas fisuras y la dirección de aplicación de la carga.

Si la rotura se produce según una de estas fisuras (que nunca son paralelas a la dirección de aplicación de la carga), hay que tener en cuenta el efecto de los valores de  $c$  (cohesión) y  $\phi$  (ángulo de rozamiento interno) propios de la fisura mineralizada, ya que en la rotura intervienen esfuerzos de cizalla, con un valor dependiente de la orientación de la fisura respecto a la distribución de esfuerzos existentes en el disco de roca.

## EVOLUCION DE LA RED FRACTOGRAFICA

Durante la realización de los ensayos mecánicos se desarrolla una fisuración que conduce a la rotura final de la roca y que comienza (cuando se supera el umbral de microfisuración) con la formación y crecimiento de microcraks en zonas condicionadas por la distribución de esfuerzos en el material y por la presencia de «defectos iniciales» (bordes de grano, «microcracks» preexistentes, etcétera).

La rotura se produce según un número pequeño de superficies de fractura que, en el caso de los ensayos de compresión uniaxial, se disponen paralelamente a la dirección de aplicación de la carga (criterio de rotura sugerido por STACEY, 1981), aunque también se producen algunas roturas donde este modelo se combina con el «conoclastico». Un caso especial lo constituyen las roturas según fisuras mineralizadas del sistema 1 (en la pirita carbonatada). Todas estas fisuras que conducen a la rotura final son transgranulares, aunque en las probetas de pirita silícea algunas siguen los bordes de los granos de pirita orientados paralelamente a la dirección de aplicación de la carga (fig. 7).

En todos los casos, aparte de estas fisuras, no se observa ningún otro tipo de fisuración, salvo algunas fisuras intergranulares cuarzo/pirita, asociadas a las fisuras principales en la pirita silícea.

En los ensayos de tracción indirecta la rotura se produce por fisuras transgranulares características, salvo en algunos discos de pirita carbonatada, cuando se produce según fisuras del sistema 1. Aparte de estas fisuras macroscópicas transgranulares, no se observa ningún otro tipo de fisuración.

El resultado de la cuantificación, mediante proceso digital de imágenes, de la fisuración desarrollada en una zona de una probeta de pirita carbonatada cargada hasta rotura en un ensayo de compresión uniaxial se observa en la figura 8.

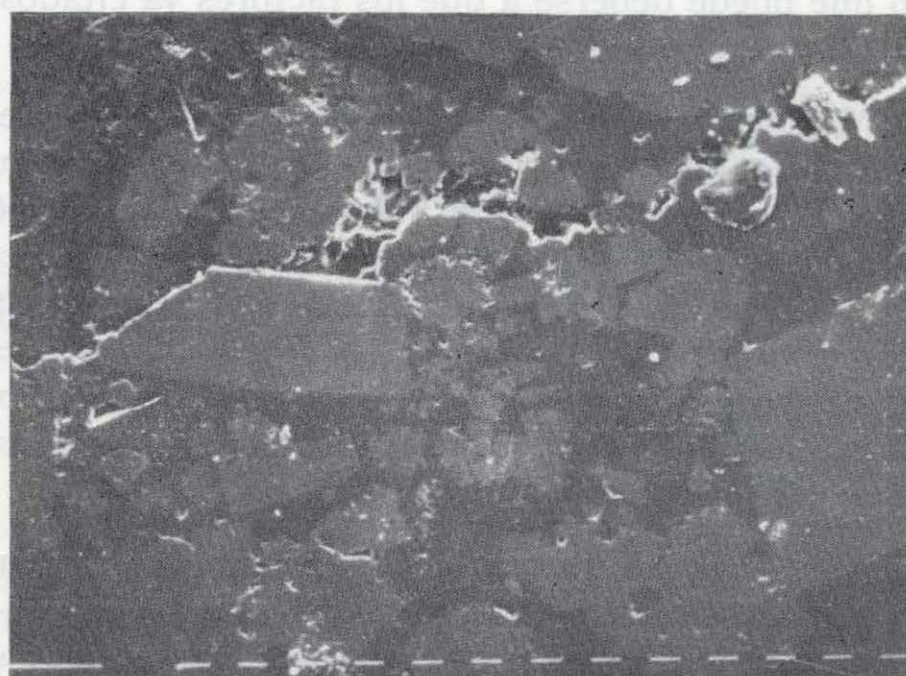


Figura 7.—Fisura transgranular desarrollada en una probeta cargada hasta rotura en un ensayo de compresión uniaxial. Pirita: color gris claro; cuarzo: color gris oscuro. Pirita silícea con calcopirita. S.E.M. (cada micromarcador: 10  $\mu$ m.).

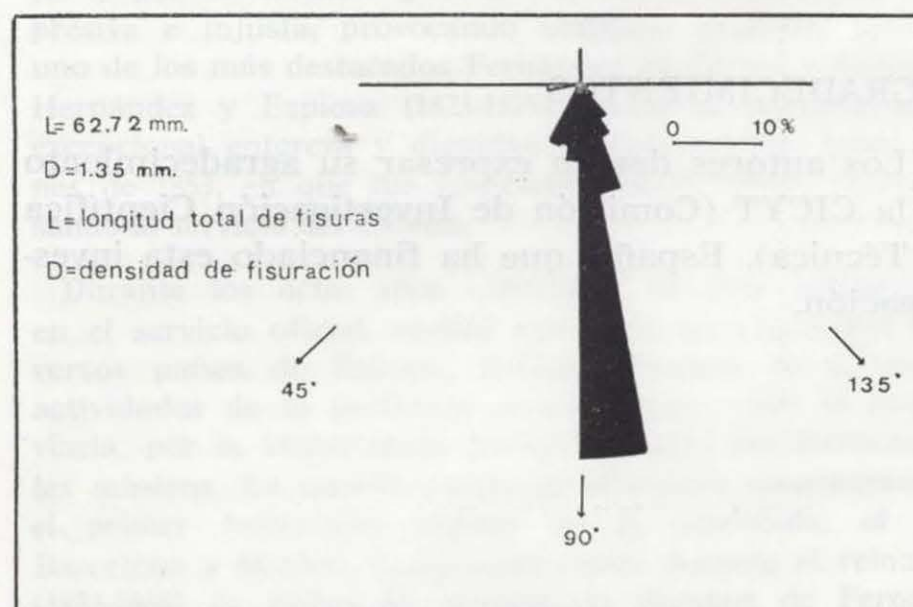


Figura 8.—Cuantificación de la fisuración desarrollada en una probeta de pirita carbonatada cargada hasta rotura (219 MPa)



## CONCLUSIONES

Ambos materiales tienen un comportamiento perfectamente elástico, con valores más altos del módulo de Young en el caso de la pirita carbonatada, debido a su textura más homogénea y de grano más fino y a la diferente composición mineralógica. La resistencia a la compresión uniaxial es menor en el caso de la pirita carbonatada, debido, sobre todo, a la presencia de fisuras mineralizadas que condicionan, parcial o totalmente, esta rotura. Los valores de la resistencia a la tracción indirecta son parecidos para ambos tipos rocosos, lo que puede deberse a que los factores ya citados no tienen tanta influencia en estos ensayos.

Por analogía con estos ensayos mecánicos puede afirmarse que, en la etapa de machaqueo de un proceso de fragmentación industrial, no se produce una separación efectiva entre los minerales que forman este tipo de rocas. Solamente se produce una reducción de tamaño de los trozos de roca de alimentación, como consecuencia del desarrollo de un número pequeño de roturas macroscópicas muy bien definidas.

Debe de señalarse que la aplicación de la técnica de emisión acústica permite un mejor conocimiento del desarrollo de los procesos de fisuración en estos ensayos mecánicos.

Una mejor cuantificación, tanto de la fisuración desarrollada en estos ensayos mecánicos, como de la mineralogía de estos materiales rocosos, se consigue mediante técnicas de proceso digital de imágenes aplicadas a preparaciones microscópicas adecuadas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la CICYT (Comisión de Investigación Científica y Técnica), España, que ha financiado esta investigación.

## BIBLIOGRAFIA

- BELIKOV, B. P.; ZALESKII, B. V.; ROZANOV, Y. A.; SANINA, E. A. y TIMCHENKO, I. P. (1967): *Methods of studying the physicommechanical properties of rocks*. In: *Physical and mechanical properties of rocks*. Israel program for Scientific Translation, Jerusalem.
- BEL-LAN, A. (1984): *Análisis de parámetros petrográficos mediante proceso digital de imágenes*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. Centro de Investigación UAM-IBM.
- FERNÁNDEZ, P. (1982): *Estudio geológico y minero del área Romanera-El Cura-Sierrecilla (Puebla de Guzmán), Faja Piritica, Huelva*. Tesis de Licenciatura. Dpto. de Petrología y Geoquímica. Facultad de Geología. Universidad de Oviedo.
- KELLY, E. G., y SPOTTISWOOD, D. J. (1982): *Introduction to mineral processing*. John Wiley & Sons. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- KRANZ, R. L. (1979b): *Crack-crack and crack-pore interactions in stressed granite*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 16, pp. 37-47.
- LOTZE, F. (1945): *Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta*. Geotekt. Forch., 6, pp. 78-92.
- MONTOTO, L. (1982): *Digital multi-image analysis: application to the quantification of rock microfractography*. IBM Journal of Research and Development, V, 26, N. 6.
- MONTOTO, M.; SUÁREZ DEL RÍO, L. M.; KHAIR, W., y HARDY, H. R. JR. (1981b): *Acoustic emission behaviour of sound to weak granites: petrographic interpretation*. Int. Symp. on Weak Rock, Tokyo.
- MONTOTO, M. (1983): *Petrophysics: the petrographic interpretation of the physical properties of rocks*. Proc. 5th Int. Congress of rock Mechanics. Melbourne (Australia), vol. B, pp. 93-98.
- OKA, Y., y MAJIMA, W. (1970): *A theory of size reduction involving fracture mechanics*. Can. Met. Q., 9, pp. 429-439.
- SUÁREZ DEL RÍO, L. M. (1982): *Estudio petrofísico de materiales graníticos geomecánicamente diferentes*. Tesis Doctoral. Dpto. de Petrología y Geoquímica. Facultad de Geología. Universidad de Oviedo.

Recibido: Mayo de 1988.